



TUGAS AKHIR - EE184801

**ANALISIS PEMODELAN BUSUR API SERI PADA LISTRIK
BERTEGANGAN RENDAH BERBASIS JARINGAN SARAF
TIRUAN**

Muhammad Hafidh As'ad
07111240000137

Dosen Pembimbing
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
Ir. Arif Musthofa, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**SERIES ARC FLASH MODELLING ANALYSIS IN LOW
VOLTAGE ELECTRICAL POWER BASED ON ARTIFICIAL
NEURAL NETWORK**

Muhammad Hafidh As'ad
NRP 07111240000137

Advisor
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
Ir. Arif Musthofa, MT.

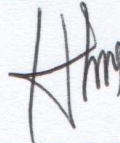
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisis Pemodelan Busur Api Seri pada Listrik Bertegangan Rendah Berbasis Jaringan Saraf Tiruan”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 17 Januari 2019



M. Hafidh As'ad

NRP. 07111240000137

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

ANALISIS PEMODELAN BUSUR API SERI PADA LISTRIK BERTEGANGAN RENDAH BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
NIP. 19810905 200501 1 002

Ir. Arif Musthofa, MT.
NIP. 19660811 199203 1 004



---Halaman ini sengaja dikosongkan---

ANALISIS PEMODELAN BUSUR API SERI PADA LISTRIK BERTEGANGAN RENDAH BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

Nama : Muhammad Hafidh As'ad
NRP : 07111240000137
Dosen Pembimbing 1: Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
Dosen Pembimbing 2: Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRAK

Insiden kebakaran di Kota Surabaya kian meningkat setiap tahunnya. Penyebab utamanya diantaranya adalah akibat hubungan pendek arus listrik. Meskipun listrik merupakan kebutuhan sehari-hari, penggunaan listrik juga dapat menyebabkan bahaya kepada penggunanya jika tidak diperlakukan dengan baik. Salah satu bahaya yang sering terjadi dan menimbulkan kejadian kebakaran adalah busur api seri yang terjadi di dalam selubung isolasi kabel. Maka dari itu, diperlukan sebuah analisa bahaya busur api listrik pada tegangan rendah sehingga keamanan para pengguna jasa listrik dapat tetap terjaga. Arus *Arc flash* pada tegangan rendah memiliki karakteristik berupa bentuk gelombang yang nilainya tinggi, namun durasi yang relative singkat. Hal ini berakibat pada tidak bereaksinya alat pengaman dalam mengatasi gangguan ini. Dalam tugas akhir kali ini, penulis akan membuat sebuah pemodelan terhadap hambatan arcing pada tegangan rendah. Pemodelan ini menggunakan metode Jaringan Saraf Tiruan yang berfungsi untuk membentuk karakteristik dari bentuk *arc flash* dengan menentukan nilai hambatan pada tempat terjadinya arcing. Pemodelan dilakukan berdasarkan kasus *arc flash* pada dua buah elektroda yang dipasang secara seri dalam rangkaian sistem tegangan rendah, dengan variabel beban berbeda-beda. Keluaran dari tugas akhir ini adalah sebuah hambatan arcing pemodelan yang mempunyai nilai $MSE < 0,05$ jika dibandingkan dengan hambatan arcing hasil percobaan di laboratorium.

Kata kunci: pemodelan, busur api, tegangan rendah, jaringan saraf tiruan

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

SERIES ARC FLASH MODELLING ANALYSIS IN LOW VOLTAGE ELECTRICAL POWER BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Name : Muhammad Hafidh As'ad
NRP : 07111240000137
Advisor 1 : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
Advisor 2 : Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRACT

The fire accident in Surabaya is increasing every year. The majority issues was due to short circuit. Even though electricity is useful and needed for every days use, electricity use can cause harm to its user if not treated properly. One of the dangers that often happened and resulting fire is the arc flash phenomenon. Arc flash that happened often without our knowing was the series arc flash that happened inside di insulation cable. Therefore, we need an analysis of the arc flash phenomenon at the lower voltage so that the electrical security of its user can be maintained. Arc flash currents at low voltages characterized by a waveform whose value is high, but relatively short duration. This resulted in not reacting safety device in overcoming this disorder. In this final project, the author will make a model of the arcing resistance at low voltage. This modeling method is Artificial Neural Network which serves to establish the characteristics of arc flash with determining the value of resistance at the scene of the arcing. The modelling is on a case of arc flash on two electrode located series in the low voltage electrical circuit system with variable loads. The output of this thesis is an arcing resistance modelling that have MSE value $< 0,05$ compared to the arcing resistance results that taken with the experiment in the laboratory.

Keyword: modeling, arc flash, low voltage, artificial neural network

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah S.W.T yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas akhir yang berjudul “**Analisis Pemodelan Busur Api Seri pada Listrik Bertegangan Rendah Berbasis Jaringan Saraf Tiruan**” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pelaksanaan dan penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dimas Anton Asfani dan Bapak Arif Musthofa, selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis selama menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Orang tua penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan.
3. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Departemen Teknik Elektro FTE ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
4. Teman-teman angkatan e52 yang membantu memberikan semangat dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Teman-teman Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang senantiasa mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan juga bagi para pembaca pada umumnya, ataupun untuk penelitian-penelitian selanjutnya yang terkait dengan topik tugas akhir ini.

Surabaya, 17 Januari 2019

M. Hafidh As'ad

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Metode Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II PEMODELAN BUSUR API LISTRIK PADA TEGANGAN RENDAH	7
2.1 Kabel Penghantar.....	7
2.2 Gangguan Kelistrikan	8
2.3 <i>Arc Flash</i>	9
2.4 Karakteristik Arus Busur Api Listrik pada Beban Resistif	10
2.5 Pemodelan	11
2.6 Jaringan Saraf Tiruan	12
2.7 Mean Square Error	15
2.8 Pemodelan Busur Api Listrik	16
BAB III PENGAMBILAN DATA DAN PEMBUATAN MODEL ARCING SERI PADA LISTRIK BERTEGANGAN RENDAH	17
3.1 Perancangan Alat Eksperimen	18
3.1.1 Sumber Tegangan.....	19
3.1.2 Modul Simulasi Arcing Seri.....	19
3.1.3 Fuse Box.....	20
3.1.4 Beban.....	21
3.1.5 Trafo Arus	21
3.1.6 NI 9246 dan NI 9223.....	22

3.1.7 Verivolt Entube DE-HB	23
3.1.8 Komputer	23
3.2 Pengambilan Data.....	24
3.3 Pengolahan Data.....	25
3.3.1 Daya	27
3.3.2 Energi.....	28
3.3.3 Hambatan Arcing	29
BAB IV PELATIHAN JARINGA SARAF TIRUAN DAN PERBANDINGAN PEMODELAN.....	33
4.1 Pelatihan Jaringan Saraf Tiruan (JST).....	33
4.1.1 Penentuan Input dan Target Jaringan Saraf Tiruan	33
4.1.2 Penentuan Fungsi Aktivasi.....	35
4.1.3 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan	35
4.1.4 Parameter Tambahan Jaringan Saraf Tiruan	36
4.2 Hasil Pelatihan Jaringan Saraf Tiruan.....	37
4.3 Perbandingan Data Pelatihan dan Data Percobaan	39
BAB V PENUTUP	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
RIWAYAT HIDUP.....	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Arc Flash</i> pada Kabel	8
Gambar 2.2 Ilustrasi <i>Arc Flash</i> pada Kabel.....	9
Gambar 2.3 Ilustrasi Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan	12
Gambar 3.1 Skema Penelitian	17
Gambar 3.2 Skema Modul Arcing Seri Listrik Tegangan Rendah	18
Gambar 3.3 Alat Percobaan Arcing Seri Listrik Tegangan Rendah	19
Gambar 3.4 Simulator Arcing Seri	20
Gambar 3.5 Fuse 6A.....	21
Gambar 3.6 CT Powell MSQ-30	21
Gambar 3.7 NI 9246 dan NI 9223	22
Gambar 3.8 Verivolt.....	23
Gambar 3.9 Software LabVIEW	24
Gambar 3.10 Arus Arcing Beban 1 Lampu	26
Gambar 3.11 Tegangan Arcing Beban 1 Lampu	26
Gambar 3.12 Arus Arcing Beban 5 Lampu	26
Gambar 3.13 Tegangan Arcing Beban 5 Lampu	27
Gambar 3.14 Arus Arcing Beban 10 Lampu	27
Gambar 3.15 Tegangan Arcing Beban 10 Lampu	27
Gambar 3.16 Daya Arcing Beban 1 Lampu	28
Gambar 3.17 Daya Arcing Beban 5 Lampu	28
Gambar 3.18 Daya Arcing Beban 10 Lampu	28
Gambar 3.19 Energi Arcing Beban 1 Lampu	29
Gambar 3.20 Energi Arcing Beban 5 Lampu	29
Gambar 3.21 Energi Arcing Beban 10 Lampu	29

Gambar 3.22 Hambatan Arcing Beban 1 Lampu	30
Gambar 3.23 Hambatan Arcing Beban 5 Lampu	30
Gambar 3.24 Hambatan Arcing Beban 10 Lampu	30
Gambar 4.1 Perbandingan R_{Arc} dan Energi pada Beban 1 Lampu.....	34
Gambar 4.2 Perbandingan R_{Arc} dan Energi pada Beban 5 Lampu.....	34
Gambar 4.3 Perbandingan R_{Arc} dan Energi pada Beban 10 Lampu.....	34
Gambar 4.4 Arsitektur Feed-Forward Backpropagation 10 Neuron	36
Gambar 4.5 Arsitektur Feed-Forward Backpropagation 20 Neuron	36
Gambar 4.6 Parameter Tambahan Training Jaringan Saraf Tiruan	36
Gambar 4.7 Monitoring Training Jaringan Saraf Tiruan.....	37
Gambar 4.8 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 10 Neuron 1 Beban	38
Gambar 4.9 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 20 Neuron 1 Beban	38
Gambar 4.10 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 10 Neuron 5 Beban	38
Gambar 4.11 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 20 Neuron 5 Beban	39
Gambar 4.12 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 10 Neuron 10 Beban	39
Gambar 4.13 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 20 Neuron 10 Beban	39
Gambar 4.14 Perbandingan R_{Arc} Percobaan dan Training 1 Beban.....	40
Gambar 4.15 Perbandingan R_{Arc} Percobaan dan Training 5 Beban.....	40
Gambar 4.16 Perbandingan R_{Arc} Percobaan dan Training 10 Beban....	40

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi CT	22
Tabel 3.2 Spesifikasi NI 9223 dan NI 9246	23
Tabel 4.1 Perbandingan Fungsi Aktivasi.....	35
Tabel 4.2 Perbandingan Akurasi Pelatihan.....	41

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Data dari tahun 2013 dan 2014 menunjukkan bahwa peristiwa kebakaran di Kota Surabaya kian meningkat seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk. Penyebab peristiwa kebakaran sendiri masih didominasi oleh peristiwa hubungan pendek arus listrik. 117 dari 433 kejadian di tahun 2013 disebabkan oleh hubungan pendek arus listrik, sementara di tahun 2014 ada 112 dari total 596 kejadian yang disebabkan oleh hubungan pendek arus listrik [1]. Hubungan pendek arus listrik ini yang kemudian menimbulkan busur api sehingga menjadikan titik ini sebagai titik awal terjadinya kebakaran. Busur api listrik yang terjadi pada tegangan rendah merupakan fenomena yang umumnya diawali dengan peristiwa dua konduktor yang saling bersentuhan (fase dengan fase / fase dengan *ground*) sehingga menimbulkan loncatan busur api. Peristiwa busur api ini memiliki arus gangguan yang cukup tinggi dibandingkan dengan arus normal sistem dan terjadi dengan durasi yang sangat singkat sehingga tidak dapat dideteksi oleh perangkat pengaman pada sistem distribusi yang biasanya hanya menggunakan MCB (*Mechanical Circuit Breaker*) dan sekering/ *fuse* [2]. Dengan jumlah pelanggan listrik rumah tangga yang sangat tinggi, keamanan instalasi listrik tegangan rendah sangatlah penting untuk diperhatikan. Selain memberikan manfaat yang sangat banyak, listrik juga dapat menjadi sebuah ancaman jika terjadi gangguan dan penanganannya tidak ditangani secara tepat.

Hubungan pendek arus listrik dapat menimbulkan *arc flash* (busur api) yang dapat memicu terjadinya kebakaran. Pada dasarnya busur api listrik pada tegangan rendah memiliki nilai arus yang biasanya cukup tinggi, namun memiliki durasi yang cenderung singkat sehingga hal tersebut membuat gangguan sulit untuk dapat dideteksi oleh perangkat pengaman seperti *fuse* maupun *circuit breaker* yang biasa digunakan sebagai pengamanan gangguan kelistrikan.

Oleh karenanya, analisa mengenai hubung singkat ini sangat perlu dilakukan agar dapat menghindari bahaya yang mungkin dapat terjadi

akibat oleh fenomena busur api tersebut. Penelitian mengenai busur api listrik ini sampai sekarang masih terus dilakukan oleh para peneliti-peneliti, di dalam maupun di luar negeri, termasuk di Laboratorium Tegangan Tinggi ITS guna menunjang bentuk penanganan dan pencegahan bahaya busur api listrik bertegangan rendah.

Untuk dapat memudahkan analisa dari busur api tegangan rendah maka diperlukan sebuah pemodelan dari hambatan arcing. Tujuan dari adanya pemodelan adalah untuk memudahkan peneliti ketika hendak melakukan analisa arcing sehingga di kemudian hari tidak perlu melakukan simulasi dan pengambilan data kembali jika bentuk gelombang dan karakteristik busur apinya sudah dapat dimodelkan. Salah satu metodenya yaitu dengan melakukan pemodelan berbasis jaringan saraf tiruan.

Jaringan saraf tiruan atau *artificial neural network* telah banyak diterapkan di berbagai permasalahan umum di dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya seperti permasalahan kemacetan lalu lintas, rekayasa transportasi darat, udara dan laut, mapun juga rekayasa arus lalu lintas komunikasi. Dalam kasus kecelakaan lalu lintas misalnya, pemodelan jaringan saraf tiruan dapat dipergunakan untuk memodelkan hubungan antara tingkat keparahan luka yang diderita korban kecelakaan lalu lintas dengan penyebab-penyebab kecelakaan yang mungkin terjadi, perilaku pengendara kendaraan, kendaraan yang digunakan, bentuk jalan, maupun keadaan lingkungan sekitar sebelum dan setelah terjadinya kecelakaan. Oleh karena itu, disini kami hendak memanfaatkan algoritma jaringan saraf tiruan dalam melakukan pemodelan hambatan arcing.

Penulis ingin melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Pemodelan Busur Api Seri Pada Listrik Bertegangan Rendah Berbasis Jaringan Saraf Tiruan” yang bertujuan untuk mengatasi permasalahan-permasalahan di atas, khususnya dalam hal ini adalah pencegahan kebakaran perumahan yang disebabkan oleh busur api listrik bertegangan rendah. Karakteristik sinyal arus, tegangan maupun hambatan saat terjadi peristiwa busur api pada tegangan rendah akan dianalisis menggunakan algoritma jaringan saraf tiruan dengan membandingkan keadaan normal dan keadaan pada saat terjadi gangguan.

Hasil analisis pemodelan ini nantinya diharapkan dapat membantu pembuatan alat proteksi yang dapat mendeteksi busur api di listrik bertegangan rendah di penelitian-penelitian selanjutnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka penulis merumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik dan pengaruh sinyal arus, tegangan, energi, dan hambatan arcing pada busur api seri di listrik bertegangan rendah?
2. Bagaimana algoritma yang tepat untuk mengoptimalkan proses pengolahan data pemodelan?
3. Berapa besar tingkat akurasi model terhadap target data yang dimodelkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik gelombang arus, tegangan, energi dan hambatan pada busur api seri listrik bertegangan rendah. Penelitian juga bertujuan untuk menguji akurasi pemodelan busur api seri berbasis jaringan saraf tiruan. Selain itu, pemodelan karakteristik busur api seri pada listrik bertegangan rendah ini juga dapat digunakan sebagai dasar pembuatan alat deteksi busur api listrik pada tegangan rendah pada penelitian-penelitian berikutnya.

1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan secara garis besar terbagi menjadi beberapa tahapan. Berikut ini akan dijelaskan beberapa tahapan metode yang dilakukan dalam penelitian ini. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari teori-teori yang terkait dengan busur api listrik tegangan rendah sekaligus hal-hal yang berhubungan dengan penelitian ini seperti *neural network* dan *training tools* pada perangkat lunak MATLAB. Studi literatur dapat dilakukan melalui jurnal, internet dan

sumber-sumber lain yang valid yang dapat mendukung penelitian ini. Adapun studi literatur juga tetap dilaksanakan selama penelitian dilakukan sampai dengan penarikan kesimpulan dari hasil penelitian yang ada. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa penelitian ini memperoleh hasil yang valid dan didukung oleh teori-teori ataupun hasil penelitian sebelumnya.

2. Persiapan

Setelah mengumpulkan dan mempelajari hal-hal yang terkait dengan penelitian, yang perlu dilakukan selanjutnya adalah melakukan persiapan untuk proses pengerjaan penelitian ini. Adapun persiapan yang dimaksud adalah mempersiapkan peralatan-peralatan yang diperlukan, seperti trafo arus untuk menunjang pengambilan data arus, verivolt untuk menunjang pengambilan data tegangan, NI 9223 dan NI 9246 untuk proses akuisisi data, chamber simulator untuk menyimulasikan percobaan busur api seri, dan berbagai alat-alat lainnya. Persiapan ini juga mencakup persiapan perangkat lunak yang akan digunakan, yaitu LabVIEW, DIADEM, MATLAB, dan berbagai program Microsoft Office yang diperlukan untuk pengolahan data.

3. Pengambilan Data Arcing Seri

Langkah berikutnya adalah melakukan pengambilan data. Proses ini adalah proses yang sangat penting karena data yang diperoleh nantinya akan digunakan untuk melakukan pemodelan di software MATLAB. Adapun prosesnya adalah dengan mengoperasikan alat simulator busur api seri yang sudah dipersiapkan dan disusun sesuai rangkaian. Pada saat simulasi, data arus dan tegangan akan diambil menggunakan alat DAQ dan software LabVIEW digunakan untuk menyimpan data tersebut ke komputer.

4. Pengolahan Data Percobaan

Pengolahan data dalam tugas akhir ini dilakukan dengan menggunakan program DIADEM yang kemudian dipindah ke

Microsoft Excel. DIADEM umumnya digunakan untuk mengolah data dalam bentuk grafik atau kurva, sedangkan Microsoft Excel digunakan untuk metode penghitungan dalam bentuk angka. Pemilihan data yang akan digunakan untuk melakukan pemodelan juga termasuk di dalam tahap ini. Selain itu, dilakukan pemotongan data yang tidak diperlukan sehingga lebih efektif dan penggeseran agar kedua gelombang berada pada fase yang sama. Gelombang arus dan tegangan tidak sefasa diakibatkan oleh alat akuisisi keduanya yang berbeda sehingga akan menimbulkan keterlambatan dari salah satu gelombang, yang dalam hal ini terjadi pada gelombang tegangan percobaan.

5. Pembuatan Model

Proses ini adalah proses utama dari penelitian ini, yakni membuat sebuah pemodelan hambatan arcing tegangan rendah. Pemodelan ini dilakukan menggunakan software MATLAB, dengan metode jaringan saraf tiruan. Adapun fungsi yang digunakan adalah menggunakan *neural network toolbox* yang tersedia di MATLAB. Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini mencakup beban lampu bohlam 100 watt berjumlah 1, 5 dan 10 buah beban.

6. Penarikan Kesimpulan

Proses penarikan kesimpulan menjadi tahapan yang terakhir dalam penelitian ini. Pada penelitian ini, dapat disimpulkan terkait pemodelan busur api tegangan, pembuatan pemodelan dan perbandingan *error* pemodelan.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini dapat dibagi menjadi 5 bab yang masing-masing memfokuskan pada suatu poin-poin pembahasan tertentu. Adapun sistematika penulisan pada tiap-tiap bab yang ada adalah sebagai berikut:

BAB 1. Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan, batasan masalah, tujuan, manfaat, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2. Pemodelan Busur Api pada Listrik Bertegangan Rendah

Bab ini berisi teori - teori penunjang yang berhubungan dengan kabel penghantar, gangguan kelistrikan, *arc flash*, karakteristik busur api pada beban resistif, pemodelan, jaringan saraf tiruan, *mean squared error*, dan pemodelan busur api listrik.

BAB 3. Pengambilan Data dan Perancangan Model Arcing Seri Pada Listrik Bertegangan Rendah

Bab ketiga berisi tentang perancangan alat eksperimen, pengambilan data, pengolahan data dan pembuatan model.

BAB 4. Pelatihan Jaringan Saraf Tiruan dan Perbandingan Pemodelan

Pada bab ini hal yang dibahas berupa pelatihan jaringan saraf tiruan, hasil pelatihan jaringan saraf tiruan dan juga perbandingan data pelatihan dan data percobaan beserta seluruh analisisnya.

BAB 5. Penutup

Bab ini merupakan bab terakhir yang berisi kesimpulan dan saran dari seluruh hasil penelitian yang telah dilakukan.

1.6 Relevansi

Tugas akhir ini dapat menjadi referensi untuk penelitian-penelitian mengenai karakteristik gelombang busur api, maupun pemodelan-pemodelan yang menggunakan algoritma jaringan saraf tiruan. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan masukan untuk pembuatan alat pendeteksian busur api, khususnya busur api seri pada listrik bertegangan rendah.

BAB II

PEMODELAN BUSUR API LISTRIK PADA TEGANGAN RENDAH

2.1 Kabel Penghantar

Kabel penghantar yang memiliki diameter hingga 4 mm² digunakan sebagai penghubung akhir dari pengawatan tetap ke peralatan atau komponen-komponen pendukung (aksesoris) pada rangkaian listrik. Pada dasarnya kabel penghantar terdiri dari konduktor beresistansi rendah untuk membawa arus kecuali dalam kasus-kasus khusus, seperti kabel pemanas yang memiliki resistansi tinggi untuk mengubah energi listrik menjadi energi panas. Kabel penghantar ini dibungkus isolator di bagian luarnya untuk mengisolasi konduktor satu dengan yang lain atau melindungi dari objek sekitarnya. Isolator yang digunakan pun biasanya terdiri dari beberapa lapis yang masing-masing memiliki bahan dan fungsi yang berbeda.

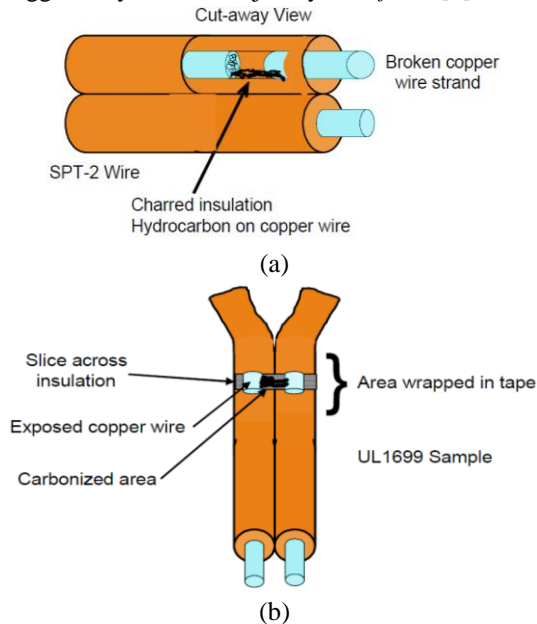
Kabel merupakan komponen paling umum dan paling sering dijumpai dalam sistem kelistrikan tegangan rendah sehingga memerlukan pemeliharaan dan penggantian apabila kabel tersebut mengalami kerusakan atau bila kondisinya sudah tidak memenuhi standar. Salah satu penyebab kerusakan ini adalah karena rusaknya bagian isolator pembungkus konduktor. Rusaknya isolator ini dapat disebabkan oleh bermacam-macam hal, baik karena penuaan, penggunaan peralatan listrik yang kurang tepat, ataupun dikarenakan gigitan hewan seperti tikus. Isolator yang sudah tidak dapat bekerja sebagaimana mestinya ini yang kemudian dapat mengalirkan arus dari konduktor menuju luar konduktor, yang merupakan indikasi telah terjadinya kegagalan isolasi.

Kerusakan kabel juga dapat terjadi pada bagian konduktor walaupun isolator masih dalam kondisi baik. Umumnya kerusakan ini disebabkan karena kabel penghantar yang tertarik (*stretched*) ataupun tertekuk (*bent*) secara sengaja maupun tidak sengaja. Karena bahan isolator kabel penghantar yang fleksibel, isolator dapat terhindar dari kerusakan, sedangkan konduktor yang memiliki bahan yang relatif lebih kaku (*rigid*) rawan mengalami kerusakan. Kerusakan konduktor tersebut

dapat berupa retakan ataupun patahan di batang konduktor dalam selubung isolator. Kerusakan-kerusakan inilah yang kemudian berpotensi menimbulkan gangguan kelistrikan.

2.2 Gangguan Kelistrikan

Gangguan kelistrikan atau *electrical fault* dapat didefinisikan sebagai peristiwa abnormal yang disebabkan oleh rusaknya salah satu ataupun beberapa bagian pada konduktor ataupun isolator saat digunakan. Kerusakan dapat terjadi pada konduktor fase, atau di antara konduktor fase dan *ground* atau semua bagian yang ditanahkan dari sistem kelistrikan seperti diilustrasikan pada gambar 2.1. Kegagalan dari isolasi padat diantaranya dapat disebabkan karena adanya tekanan mekanik yang dikenakan pada isolasi, penuaan, dan juga karena fenomena korona[3]. Rusaknya isolasi yang melindungi bagian konduktor bertegangan dapat menyebabkan terjadinya *short circuit* antar inti kabel (antar fase maupun L & N) sehingga menyebabkan terjadinya *arc flash* [4].

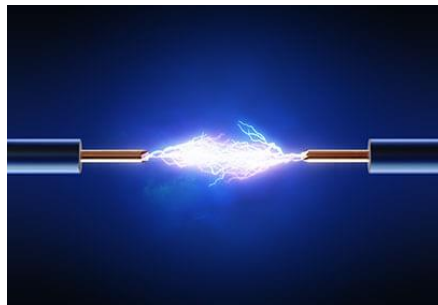


Gambar 2.1 Ilustrasi busur api seri (a) dan busur api paralel (b)[5]

Kerusakan isolasi pada sebuah konduktor dapat diakibatkan oleh berbagai hal, seperti adanya tekanan mekanik dari luar maupun karena proses penuaan dari kabel itu sendiri. Kerusakan isolasi ini sering dianggap remeh oleh manusia, padahal jika muncul arus hubung singkat, dapat memunculkan busur api listrik dan dapat memicu terjadinya kebakaran.

2.3 *Arc Flash*

Arcing adalah sebuah peluahan elektrik yang mengalir diantara dua elektroda melalui gas atau uap air [5]. Peluahan tersebut menimbulkan percikan listrik di tempat terjadinya arcing seperti pada gambar 2.2. *Arc Flash* dapat terjadi akibat adanya hubung singkat pada suatu sistem kelistrikan. Hubung singkat dapat terjadi karena kontak langsung kedua konduktor yang berbeda potensial, baik itu antar fasa maupun antara fasa dengan tanah. Umumnya konduktor yang mengalami hubung singkat umumnya memiliki isolasi yang tidak standar, atau mengalami penurunan kualitas isolasi sehingga konduktor pada bagian dalam kabel bersentuhan dan menumbulkan busur api.



Gambar 2.2 Ilustrasi *Arc Flash* pada Kabel [6]

Arc memiliki tiga wilayah umum: katoda, anoda, dan kolom positif. Drop tegangan didalam katoda ada di sekitar 20 V atau kurang [7]. Drop tegangan dalam wilayah anoda biasanya jauh lebih kecil. Kolom positif, atau plasma, memiliki gradient tegangan yang cukup seragam [8].

Kebakaran mungkin terjadi jika lokasi terjadinya busur api berada dekat dengan bahan yang mudah terbakar, dan terdapat oksigen yang kemudian melengkapi segitiga api. Busur api listrik yang terjadi pada tegangan rendah bisa berbahaya karena karakteristik arusnya yang meski memiliki nilai yang cukup besar, namun memiliki durasi yang singkat sehingga mengakibatkan fuse atau MCB tidak dapat mendeteksi terjadinya gangguan listrik.

Nilai hambatan *arc flash* tergantung dari arus, tegangan dan energi dari arc flash. Pada saat arus arcing mengecil, nilai hambatan arcing akan mengalami kenaikan. Di sisi lain, *arc flash* memiliki karakteristik energi yang relatif naik dari waktu ke waktu saat proses terjadinya arcing dan akan mulai berhenti mengalami perubahan nilai ketika fenomena *arc flash* sudah berakhir. Hal ini disebabkan karena pada saat fenomena *arc flash* berakhir, sudah tidak terdapat lonjakan daya yang terjadi dikarenakan rangkaian telah menjadi *open*.

2.4 Karakteristik Arus Busur Api Listrik pada Beban Resistif

Beberapa karakteristik umum arus busur api listrik pada beban resistif yang telah diidentifikasi antara lain [9]:

1. Di setiap setengah cycle, arus memiliki dua nilai yaitu tidak bernilai (seolah-olah bernilai nol) dan bernilai ,begitu seterusnya setiap setengah cycle .
2. Laju kenaikan dan maksimum (*max*) arus biasanya selalu lebih besar disbanding arus beban normal.
3. Busur api listrik bukanlah fenomena dengan bentuk gelombang stasioner, segmen arusnya dapat berdampingan dengan segmen aliran arus normal.
4. Muncul *noise* frekuensi tinggi pada arus busur api listrik (dari 10kHz sampai dengan 1GHz)
5. Pada busur api listrik seri (*series arcing fault*), arusnya lebih kecil disbanding arus non-gangguan pada rangkaian yang sama.

6. Sedangkan pada busur api listrik paralel (*parallel arcing fault*), arusnya meningkat secara signifikan. Arus busur api lebih besar disbanding arus normal.

2.5 Pemodelan

Model adalah beberapa deskripsi dari sebuah sistem, bagian terpisah dari hal yang nyata di dunia [10]. Pemodelan akan dibuat untuk merepresentasikan aspek yang penting dari sebuah sistem yang ada sesungguhnya. Pemodelan sendiri tidak akan mencapai kesempurnaan seperti dengan kondisi nyata aspek yang dimodelkan. Hanya beberapa aspek yang kemudian dapat diambil sebagai bahan pertimbangan pembuatan model, sedangkan pada sisi yang lain aspek tersebut diabaikan. Beberapa konsep kunci dari sebuah model adalah: pemisahan, pemilihan dan parsimony [11]. Adapun maksud dari ketiga konsep diatas adalah sebagai berikut:

1. Pemisahan

Sebelum melakukan pemodelan, batas ruang lingkup dari sebuah sistem harus ditentukan agar hasil pemodelan tidak keluar dari hasil yang diinginkan. Pemodelan harus terpisah dari aspek yang tidak ditentukan.

2. Pemilihan

Hanya beberapa aspek yang diambil sebagai bahan pertimbangan dalam membuat sebuah model sesuai dengan ruang lingkup yang ditentukan. Hal ini dilakukan untuk memudahkan proses pemodelan.

3. Parsimony

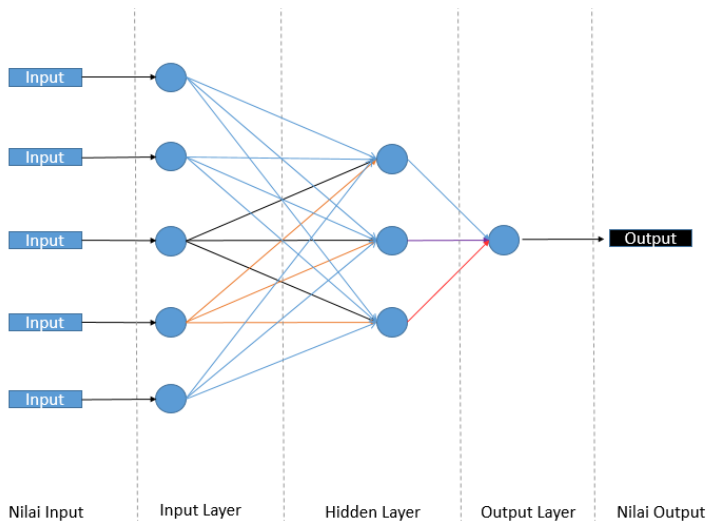
Maksud dari parsimony adalah membuat sebuah model dengan sesederhana mungkin guna memudahkan pemahaman terhadap model itu sendiri.

Fungsi dari model adalah untuk memahami lingkungan sekitar, kemudian untuk menyimulasikan sebuah sistem seperti penyebab kerusakan sebuah sistem, optimalisasi sistem, dan lain-lain. Di sisi lain, pembuatan sebuah model dapat menghindarkan peneliti untuk melakukan eksperimen yang sesungguhnya. Hal ini dapat meningkatkan kemudahan

dan keamanan sekaligus memfasilitasi para peneliti untuk melakukan analisa-analisa terhadap suatu fenomena.

2.6 Jaringan Saraf Tiruan

Menurut J. J. Siang, Jaringan saraf tiruan merupakan unit pemroses yang terdiri dari beberapa masukan serta beberapa keluaran [12]. Arsitektur jaringan saraf tiruan dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.3. Arsitektur jaring saraf tiruan pada dasarnya mengadaptasi struktur neuron pada jaringan otak manusia. Jaringan saraf tiruan membandingkan nilai *threshold* dengan hasil perhitungan *input* yang dikalikan dengan penimbang dan dijumlahkan dengan biasnya. Bila keluaran lebih besar dari *threshold* maka keluaran bernilai 1, sebaliknya bernilai 0.



Gambar 2.3 Ilustrasi Arsitektur Dasar Jaringan Saraf Tiruan

Salah satu metode JST adalah *backpropagation*, yaitu algoritma pembelajaran untuk mengurangi nilai kesalahan/*error* dengan cara menyesuaikan penimbang dan bias berdasarkan perbandingan keluaran dan target yang diinginkan. *Backpropagation* termasuk dalam metode

pelatihan terbimbing (*supervised*) yang didesain untuk operasi pada jaringan saraf tiruan *feed forward* lapis jamak (*multi-layer*) [13]. *Backpropagation* telah diaplikasikan di berbagai permasalahan yang erat dengan kehidupan sehari-hari, sehingga dapat dikatakan bahwa metode ini merupakan salah satu metode komputasi yang handal.

Backpropagation secara arsitektur memiliki tiga buah lapis dalam proses pelatihannya. Lapis pertama merupakan lapis masukan (*input layer*), lalu diikuti dengan lapis tersembunyi (*hidden layer*) dan lapis keluaran (*output layer*). Lapis pada *backpropagation* ini merupakan perkembangan dari jaringan lapis tunggal yang hanya memiliki dua lapis yang berupa lapis masukan dan keluaran saja. Dengan adanya lapis keluaran pada *backpropagation*, nilai *error* pada *backpropagation* lebih kecil dibandingkan nilai eror pada jaringan lapis tunggal karena lapis tersembunyinya berfungsi untuk memperbarui penimbang.

Algoritma jaringan saraf tiruan *backpropagation* terdiri dari dua tahapan, *feed-forward* dan *backpropagation* dari erornya, berikut adalah bentuk dasar algoritma dari pelatihan *backpropagation* [14]:

1. Inisialisasi penimbang (pemberian nilai kecil dengan acak).
2. Mengulangi langkah 3-10 sampai kondisi akhir iterasi dipenuhi.
3. Untuk sepasang data pelatihan, dilakukan langkah 4-9.
4. Masing-masing unit masukan (X_i , $i = 1, 2, \dots, n$) menerima sinyal masukan X_i dan sinyal tersebut kemudian disebarkan ke unit-unit pada bagian berikutnya (menuju unit-unit lapis tersembunyi).
5. Masing-masing unit di lapis tersembunyi (Z_j , $j = 1, 2, 3 \dots p$) dikalikan dengan penimbang dan dijumlahkan serta ditambah dengan biasnya.

$$Z_{inj} = V_{oj} + \sum_{i=1}^n X_i V_{ij} \dots \dots \dots (2.1)$$

kemudian dihitung sesuai dengan fungsi pengaktif yang digunakan:

$$Z_j = f(Z_{inj}) \dots \dots \dots (2.2)$$

bila yang digunakan adalah fungsi sigmoid maka bentuk fungsi tersebut adalah:

$$Z_j = \frac{1}{1 + \exp(-Z_{inj})} \dots \dots \dots (2.3)$$

Sinyal keluaran dari fungsi pengaktif tersebut dikirim ke semua unit keluaran.

6. Masing-masing unit keluaran (Y_k , $k = 1, 2, 3 \dots m$) dikalikan dengan penimbang dan dijumlahkan serta ditambah dengan biasnya.

$$y_{ink} = W_{0k} + \sum Z_j W_{jk} \dots \dots \dots (2.4)$$

Kemudian dihitung kembali sesuai dengan fungsi pengaktif:

$$y_k = f(y_{ink}) \dots \dots \dots (2.5)$$

7. Masing-masing unit keluaran (Y_k , $k = 1 \dots m$) menerima pola target yang berhubungan dengan pola masukan data pelatihan dan dihitung erornya:

$$\delta_k = (t_k - y_k) f'(y_{ink}) \dots \dots \dots (2.6)$$

Karena $f'(y_{ink}) = y_k$ menggunakan fungsi sigmoid, maka:

$$f'(y_{ink}) = f(y_{ink}) (1 - f(y_{ink}))$$

$$f'(y_{ink}) = y_k (1 - y_k) \dots \dots \dots (2.7)$$

Menghitung perbaikan penimbang (kemudian untuk memperbaiki W_{jk}).

$$\Delta W_{jk} = \alpha \cdot \delta_k \cdot Z_j \dots \dots \dots (2.8)$$

Menghitung perbaikan koreksi:

$$\Delta W_{0k} = \alpha \cdot \delta_k \dots \dots \dots (2.9)$$

dan menggunakan nilai δ_k pada semua unit lapis sebelumnya.

8. Masing-masing penimbang yang menghubungkan unit-unit lapis keluaran dengan unit-unit pada lapis tersembunyi (Z_j , $j = 1, 2, 3, \dots p$) dikalikan δ_k dan dijumlahkan sebagai masukan ke unit-unit lapis berikutnya.

$$\delta_{inj} = \sum \delta_k \cdot W_{jk} \dots \dots \dots (2.10)$$

Selanjutnya dikalikan dengan turunan dari fungsi pengaktifnya untuk menghitung eror.

$$\delta_j = \delta_{_inj} f'(y_{ink}) \dots \dots \dots (2.11)$$

Langkah berikutnya menghitung perbaikan penimbang (digunakan untuk memperbaiki V_{ij}).

$$\Delta V_{ij} = \alpha \cdot \delta_j \cdot X_i \dots \dots \dots (2.12)$$

Kemudian menghitung perbaikan bias (untuk memperbaiki V_{0j}).

$$\Delta V_{0j} = \alpha \cdot \delta_j \dots \dots \dots (2.13)$$

9. Masing-masing keluaran unit ($Y_k, k = 1, 2, 3, \dots m$) diperbaiki bias dan penimbangnya ($j=0, \dots, p$),

$$W_{jk}(\text{baru}) = W_{jk}(\text{lama}) + \Delta W_{jk} \dots \dots \dots (2.14)$$

Masing-masing unit tersembunyi ($Z_j, j = 1, 2, 3, \dots p$) diperbaiki bias dan penimbangnya ($j=0, \dots, n$).

$$V_{jk}(\text{baru}) = V_{jk}(\text{lama}) + \Delta V_{jk} \dots \dots \dots (2.15)$$

10. Uji kondisi pemberhentian (akhir iterasi).

Selain parameter-parameter tersebut, terdapat parameter lain yang menentukan keberhasilan tahap pelatihan pada algoritma *backpropagation* yaitu momentum (α) dan laju pelatihan (η). Momentum dan laju pelatihan digunakan untuk mempercepat dan mengefektifkan konvergensi algoritma *backpropagation*. Sehingga persamaan (2.8) menjadi:

$$\Delta w_j(t+1) = \alpha \partial_{kzj} + \mu \Delta w_{jk}(t) \dots \dots \dots (2.16)$$

Sedangkan persamaan (2.11) akan berubah menjadi:

$$\Delta v_0(t+1) = \alpha \delta_j x_i + \mu \Delta v_{ij}(t) \dots \dots \dots (2.17)$$

2.7 Mean Square Error

Mean Square Error (MSE) merupakan metode untuk menguji keakuratan sebuah model. Error yang ada menunjukkan seberapa besar perbedaan hasil estimasi pemodelan dengan nilai yang diestimasi. Perbedaan ini biasa terjadi karena adanya persebaran data aktual yang seringkali tidak sesuai dengan kondisi ideal yang berpola tertentu. Berikut ini adalah rumus penghitungan dari MSE:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - F_i)^2}{n} \dots \dots \dots (2.18)$$

n = Jumlah Sampel

X_i = Nilai actual indeks

F_i = Nilai prediksi indeks

2.8 Pemodelan Busur Api Listrik

Pembuatan pemodelan pada suatu busur api listrik khususnya pada jaringan listrik bertegangan rendah akan semakin meningkat mengingat banyaknya rumah yang teraliri listrik yang tidak ditunjang dengan kesadaran keamanan bahaya dan pencegahan terjadinya hubungan pendek arus listrik. Instalasi pada perumahan seringkali dipakai tidak sesuai standar dan penggunaannya seringkali disalahgunakan. Beberapa kabel yang terkelupas masih dibiarkan begitu saja sehingga jika terjadi kontak diantara kedua kabel yang terkelupas tersebut maka akan terjadi peristiwa hubung singkat yang memicu munculnya busur api yang kemudian memicu terjadinya kebakaran.

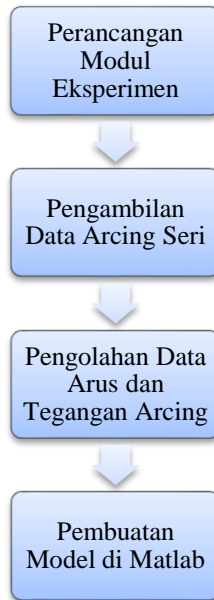
Di tahun 1941, schurig memaparkan bahwa tegangan arc biasanya memiliki puncak yang datar dan besar arus arcing-fault berada diantara 57% sampai 100% dari arus hubung singkat [15]. Nilai pasti arus dari hubung singkat hingga saat ini masih belum ada standar mutlak, karena banyaknya faktor yang mempengaruhi besar dan bentuk arus yang terjadi.

Pada rumah tangga beban yang digunakan umumnya berupa beban resistif murni, oleh karenanya penelitian ini juga akan menggunakan bentuk pemodelan beban resistif murni.

BAB III

PENGAMBILAN DATA DAN PERANCANGAN MODEL ARCING SERI PADA LISTRIK BERTEGANGAN RENDAH

Dalam bab ini akan metodologi dalam melakukan penelitian. Skema penelitian dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



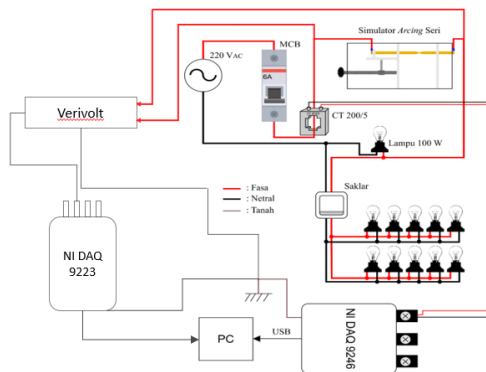
Gambar 3.1 Skema Penelitian

Adapun perincian dari alur penelitian pada skema diatas adalah sebagai berikut:

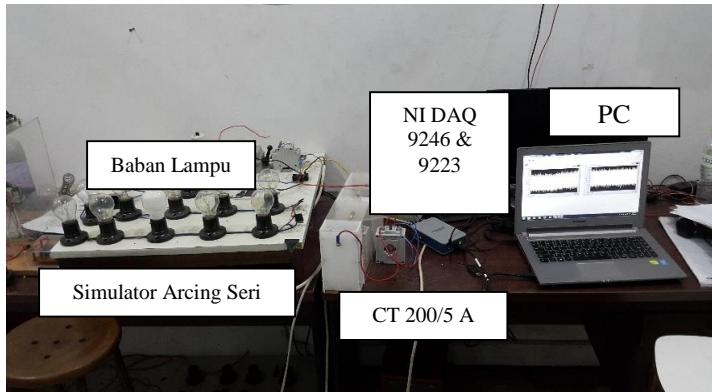
3.1 Perancangan Alat Eksperimen

Dalam tugas akhir ini, peristiwa *arc flash* tegangan rendah dibuat semirip mungkin dengan beban rumah tangga, dalam hal ini pada pelanggan listrik berkapasitas daya 1300VA. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan perangkat yang ada pada laboratorium. Penelitian ini diawali dengan perancangan alat eksperimen. Alat tersebut merupakan representasi sebuah instalasi listrik sederhana dengan menggunakan sumber listrik PLN, sebuah fuse, beban lampu bohlam variabel sebanyak 10 buah, dua buah *Current Transformer*, sebuah *Verivolt* dan dua elektroda terpisah yang dipasang secara seri dalam rangkaian.

Gambar 3.2 dan 3.3 di bawah ini menunjukkan skema dan perancangan dari alat eksperimen busur api seri pada listrik bertegangan rendah:



Gambar 3.2 Skema Modul Arcing Seri Listrik Tegangan Rendah



Gambar 3.3 Alat Percobaan Arcing Seri Listrik Tegangan Rendah

Adapun Perincian dari alat percobaan pada gambar 3.2 dapat dijabarkan sebagai berikut:

3.1.1 Sumber Tegangan

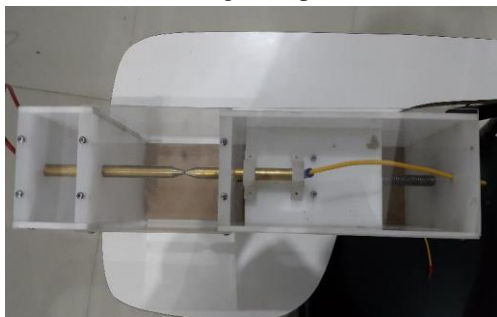
Sumber dari alat percobaan dalam penelitian ini berasal dari PLN 1 fasa dengan V_{rms} 220 V dan frekuensi 50 Hz. Namun patut menjadi catatan bahwa nilai tersebut bukanlah nilai yang tetap karena sumber PLN memiliki sedikit perbedaan nilai yang nilainya tidak begitu jauh dari nilai tersebut.

3.1.2 Modul Simulasi Arcing Seri

Simulator *arcing* seri ini terdiri atas casing berbahan akrilik dengan landasan kayu, 2 batang elektroda yang masing-masing ujungnya terhubung ke kabel fasa secara seri dan tuas pemutar sebagai pencipta *gap* antara kedua elektroda. Elektroda penghantar terdiri atas 2 batang logam kuningan dengan diameter 10 mm, dimana 1 batang elektroda dapat digeser melalui tuas pemutar dan satu batang lainnya *fixed*. Mekanisme tuas penggeser batang elektroda menggunakan mur drat yang dipasang pada dua buah *bearing*, yang menghasilkan ketelitian penggeseran cukup tinggi.

Fenomena *arcing* seri dibuat dengan cara menggeser salah satu batang elektroda mendekati batang elektroda lainnya hingga membuat jarak celah yang sangat kecil di antara kedua batang. Dikarenakan tegangan yang digunakan adalah tegangan rendah, yaitu 220 volt AC, berdasarkan hasil pengukuran, jarak antar elektroda agar terjadi *arcing* seri adalah <0.05 mm, dimana jarak 0.05 mm adalah jarak celah yang sangat kecil, sehingga dibutuhkan mekanisme penggeser elektroda yang memiliki ketelitian geser yang tinggi.

Simulator *arcing* seri dilengkapi dengan penutup berbahan dasar akrilik yang tembus pandang seperti ditunjukkan pada gambar 3.4. Hal ini bertujuan agar saat simulasi percobaan, fenomena *arcing* dapat diamati dengan baik dan aman. Masing-masing elektroda memiliki ujung yang terhubung dengan kabel penghantar. Kabel penghantar tersebut kemudian dirangkai secara seri di dalam rangkaian percobaan.



Gambar 3.4 Simulator *Arcing* Seri

3.1.3 Fuse box

Fuse box, seperti pada gambar 3.5, digunakan sebagai pengaman pada rangkaian percobaan. Rating fuse tersebut adalah sebesar 6A. hal ini dimaksudkan untuk menyimulasikan perumahan yang memiliki kapasitas daya 1300 VA sekaligus menguji apakah fuse dapat mengamankan arus hubung singkat yang diiringi oleh fenomena busur api listrik.



Gambar 3.5 Fuse 6A

3.1.4 Beban

Pada penelitian kali ini menggunakan beban resistif berupa lampu bohlam dengan spesifikasi 220 VA 100 Watt sebanyak 10 buah yang dihubungkan secara paralel. Karena bebannya bersifat resistif, maka faktor daya $\cos \phi = 1$ dan beban total dari percobaan ini adalah sebesar 1000 Watt.

3.1.5 Trafo Arus

Trafo arus digunakan untuk mengukur arus pada sumber dan pada kabel yang terhubung pada elektroda tempat terjadi hubung singkat. Fungsi dari trafo arus adalah menurunkan nilai arus untuk keamanan alat ukur agar menghindari nilai arus yang diamati melebihi batas nilai yang diijinkan pada alat ukur. Adapun ratio dari CT yang digunakan adalah 200/5 dengan jenis Powell MSQ-30 seperti pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 CT Powell MSQ-30

Berikut adalah spesifikasi lengkap dari CT yang digunakan:

Tabel 3.1 Spesifikasi CT

Jenis CT	Powell MSQ-30
Rasio CT	200/5
Class CT	1
Burden CT	5
Range Frekuensi	50-60Hz

3.1.6 NI 9246 dan NI 9223

NI 9246 dan NI 9223 adalah sebuah alat *data acquisition* atau alat akuisisi data. Alat ini adalah keluaran dari National Instrument. Dalam penggunaannya, alat ini akan terhubung ke PC dan dikontrol menggunakan program Labview. NI 9246 adalah alat yang digunakan untuk mengukur arus, dalam hal ini adalah arus sumber dan arus arcing, sedangkan NI 9223 adalah alat yang digunakan untuk mengukur tegangan, dalam hal ini adalah tegangan sumber.



Gambar 3.7 NI 9246 dan NI 9223

Tabel 3.2 Spesifikasi NI 9223 dan NI 9246

NI 9223	
Range Tegangan Input	+/- 10 V
Impedansi Input	>1 GΩ
Sample Rate	1 MHz
NI 9246	
Range Arus Input	+/- 20 A
Sample Rate	50 Hz

3.1.7 Verivolt Entube DE-HB

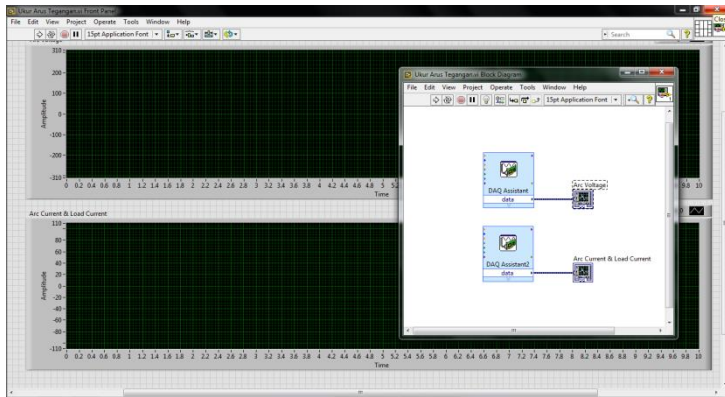
Penggunaan DAQ memerlukan impedansi yang tinggi. Dalam hal ini, untuk mengukur tegangan secara dengan probe tegangan konvensional tidaklah memungkinkan. Maka dari itu digunakanlah Verivolt seperti pada gambar 3.8. Verivolt Entube DE-HB merupakan sensor tegangan dengan masukan tegangan maksimal 2000V, dan tegangan output maksimal 10V. alat ini akan terhubung dengan NI 9223.



Gambar 3.8 Verivolt

3.1.8 Komputer

Komputer digunakan untuk mengontrol proses akusisi data. Software yang digunakan adalah NI LabView kemudian data tersebut diolah menggunakan Diadem. Berikut ini adalah layout dari pengambilan data menggunakan LabVIEW:



Gambar 3.9 Software LabVIEW

3.2 Pengambilan Data

Setelah semua sudah terangkai dengan baik seperti layout pada gambar 3.2, proses pengambilan data pun dimulai. Adapun langkah-langkah akusisi data dari percobaan busur api listrik pada tegangan rendah adalah sebagai berikut:

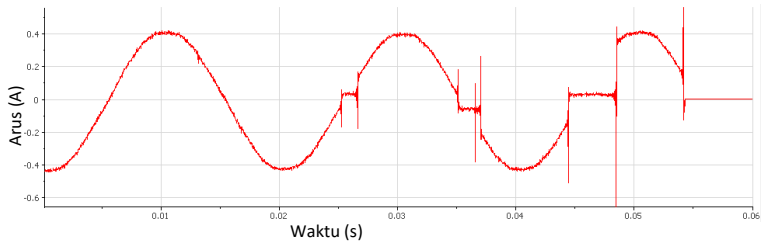
1. Pada keadaan mula-mula semua peralatan dalam kondisi off, termasuk circuit breaker yang dekat dengan sumber
2. Hidupkan komputer dan sambungkan stop kontak instalasi, adaptor verivolt, dan adaptor motor penggerak kabel pada listrik PLN
3. Sambungkan NI 9246 pada CT kemudian sisi lainnya pada komputer berupa sambungan USB dan NI 9223 pada verivolt kemudian sisi lainnya pada komputer berupa sambungan USB pula
4. Buka program LabVIEW pada komputer kemudian buatlah blok seperti yang ada pada gambar 3.9. Setting masing-masing blok sehingga terkoneksi pada masing-masing DAQ baik arus maupun tegangan. Kemudian atur skalanya sesuai dengan masing-masing alat bantu ukur. Atur jumlah sampel menjadi 100K dan jumlah sampel per detik 10K. centang enable logging

pada masing-masing DAQ dan tentukan tempat tujuan penyimpanan agar muncul hasil percobaan dalam format .tdms yang kemudian diolah menggunakan Diadem.

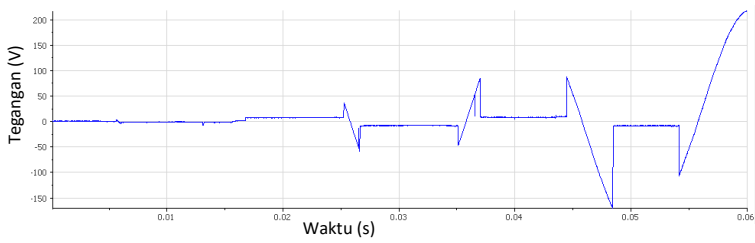
5. Beban 1, 5 dan 10 buah lampu dengan masing-masing beban sebanyak 10 percobaan.
6. Setelah semua siap, nyalakan circuit breaker yang dekat dengan sumber, kemudian pastikan fuse pada kabel paralel dalam keadaan nyala pula.
7. Run program LabVIEW, kemudian pisahkan ujung elektroda simulator dengan menggunakan alat penggerak pada modul dan terjadilah spark yang menandai terjadinya hubung singkat seri seperti diilustrasikan pada gambar 2.2 sebelumnya.
8. Setelah proses akusisi data menggunakan LabVIEW selesai, cabut stop kontak dan adaptor dari sumber listrik
9. Buka software Diadem. Akan terlihat arus dan tegangan tidak dalam satu fasa. Hal ini adalah efek dari proses akusisi data yang menggunakan dua DAQ untuk arus dan tegangan. Kemudian hapus data pada tegangan hingga dapat bergeser dan sefasa dengan arus. Hapus data-data dari arus dan tegangan yang tidak diinginkan.

3.3 Pengolahan Data

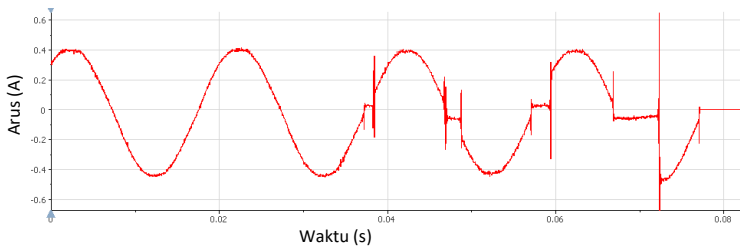
Setelah dilakukan akusisi data, maka proses selanjutnya adalah pengolahan dari data tersebut. beberapa parameter kemudian ditentukan untuk dapat merepresentasikan karakteristik fenomena dari busur api pada tegangan rendah. Berikut adalah grafik tegangan dan arus pada busur api seri bertegangan rendah pada beban 1, 5 dan 10 lampu:



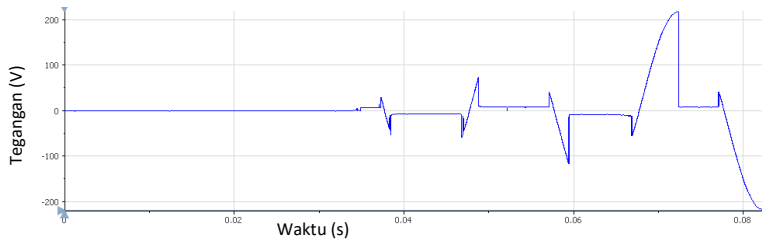
Gambar 3.10 Arus Arcing Beban 1 Lampu



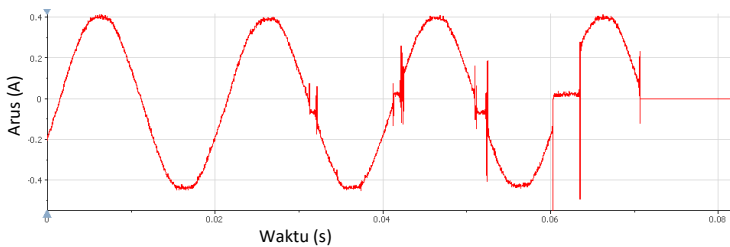
Gambar 3.11 Tegangan Arcing Beban 1 Lampu



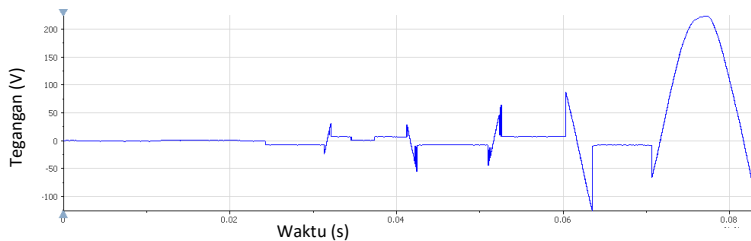
Gambar 3.12 Arus Arcing Beban 5 Lampu



Gambar 3.13 Tegangan Arcing Beban 5 Lampu



Gambar 3.14 Arus Arcing Beban 10 Lampu



Gambar 3.15 Tegangan Arcing Beban 10 Lampu

3.3.1 Daya

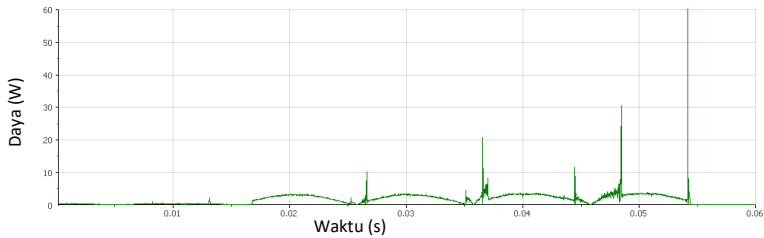
Pada tinjauan pustaka telah diketahui bahwa untuk menghitung daya pada listrik arus bolak-balik menggunakan formula:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots(3.1)$$

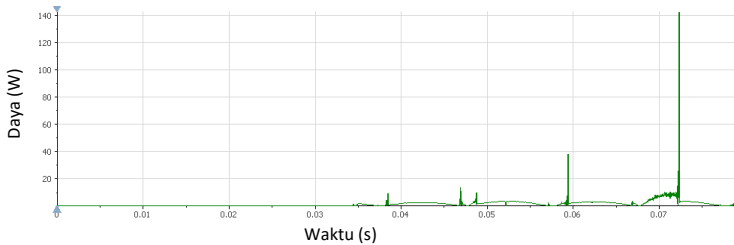
Pada sub-bab sebelumnya telah dijelaskan bahwa beban yang digunakan bersifat resistif, sehingga rangkaian listrik ini bisa dikatakan memiliki faktor daya ($\cos \varphi \approx 1$) sehingga formula (3.1) tersebut menjadi:

$$P = V \times I \dots\dots\dots(3.2)$$

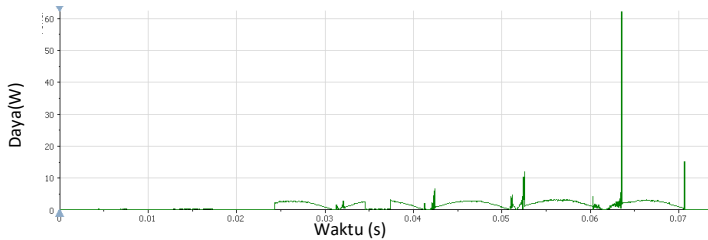
Berikut adalah hasil plot daya arcing pada beban 1, 5 dan 10 lampu



Gambar 3.16 Daya Arcing Beban 1 Lampu



Gambar 3.17 Daya Arcing Beban 5 Lampu



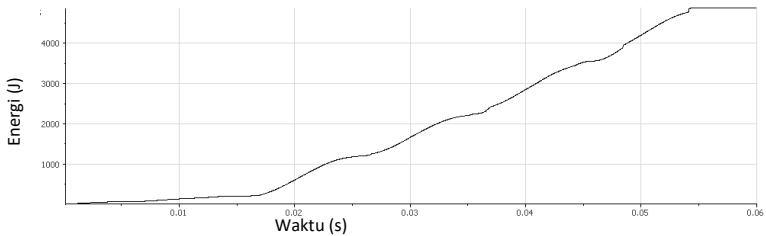
Gambar 3.18 Daya Arcing Beban 10 Lampu

3.3.2 Energi

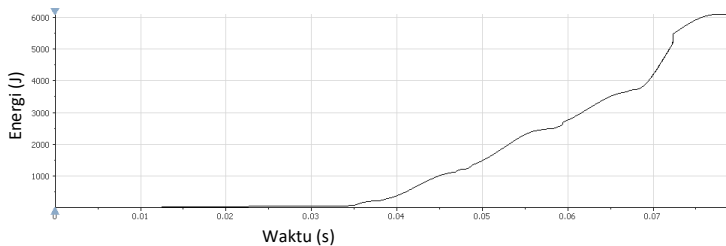
Energi adalah jumlah daya dalam satuan waktu. Dalam percobaan ini, energi digunakan untuk menentukan R arc. Energi yang diambil adalah energi di tempat terjadi arc. Energi dihitung mulai dari saat terjadi arc.

$$E = V \times I \times \Delta t \dots\dots\dots(3.3)$$

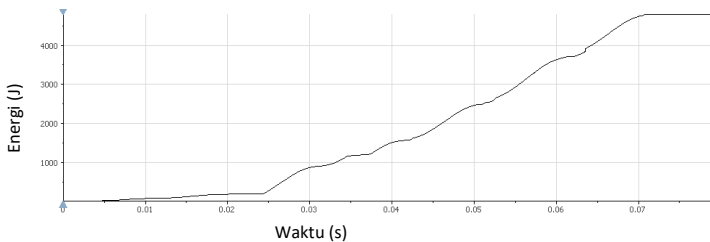
Berikut adalah hasil plot energi arcing pada beban 1, 5 dan 10 lampu



Gambar 3.19 Energi Arcing Beban 1 Lampu



Gambar 3.20 Energi Arcing Beban 5 Lampu



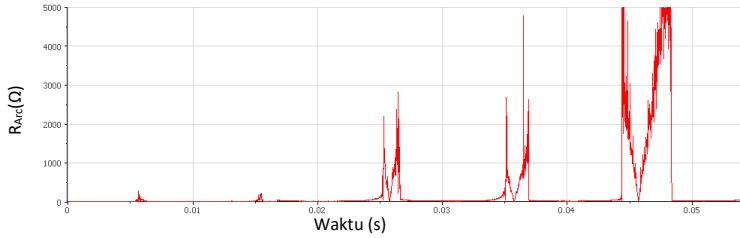
Gambar 3.21 Energi Arcing Beban 10 Lampu

3.3.3 Hambatan Arcing

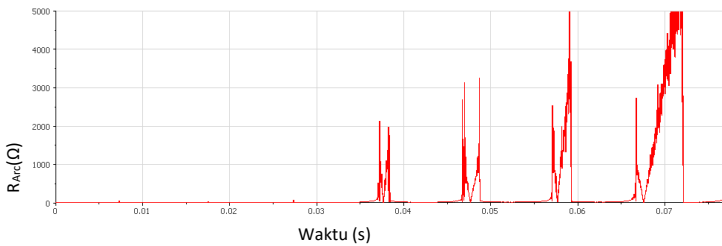
Nilai hambatan yang dimaksud disini adalah resistansi pada tempat terjadinya busur api listrik, kita namakan dengan R_{arc} . Nilai dari R_{arc} didapatkan dari:

$$R_{Arc} = \frac{V_{Arc}}{I_{Arc}} \dots\dots\dots(3.4)$$

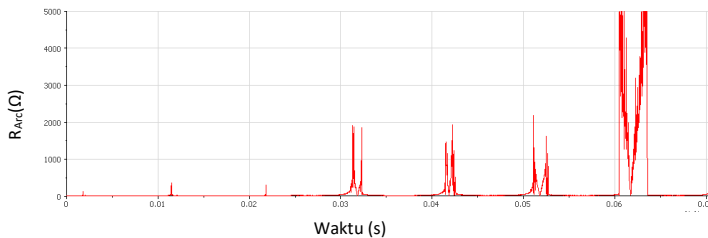
Setelah didapatkan nilai R_{arc} , nilai tersebut digunakan untuk menjadi target pelatihan Neural Network yang berfungsi sebagai parameter karakteristik dari gelombang busur api seri untuk masing-masing beban seperti terlihat pada gambar berikut:



Gambar 3.22 Hambatan Arcing Beban 1 Lampu



Gambar 3.23 Hambatan Arcing Beban 5 Lampu



Gambar 3.24 Hambatan Arcing Beban 10 Lampu

Dari hasil percobaan akuisisi data dan pengolahan data telah didapatkan gelombang dalam bentuk arus, tegangan, daya, energi dan hambatan arcing. Telah didapatkan pula hasil perbandingan percobaan

antara beban 1, 5 dan 10 lampu. Pada tahap berikutnya, data-data tersebut akan digunakan untuk pemodelan pelatihan menggunakan jaringan saraf tiruan.

Dari hasil percobaan sementara didapatkan pola hambatan arcing yang nilainya semakin besar dari waktu ke waktu seiring berjalannya fenomena arcing seri. Pola perubahan nilai R_{arc} ini seakan mengikuti kenaikan nilai energi saat terjadi arcing. Pola inilah yang kemudian menjadi dasar dijadikannya R_{arc} sebagai target pelatihan jaringan saraf tiruan pada perangkat lunak MATLAB.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB IV

PELATIHAN JARINGAN SARAF TIRUAN DAN PERBANDINGAN PEMODELAN

Pada bab ini akan ditampilkan hasil dari pemodelan hambatan arcing tegangan rendah dengan menggunakan feed-forward backpropagation neural network melalui *training tools* yang ada pada MATLAB. Pembahasan akan mencakup bentuk hambatan arcing percobaan yang akan dibandingkan dengan hambatan arcing pemodelan jaringan saraf tiruan menggunakan MATLAB. Pada bab sebelumnya telah dijelaskan tahap pembuatan model. Kemudian telah dijelaskan bahwa penelitian ini menggunakan beban resistif berupa lampu bohlam sebanyak 1, 5 dan 10 buah yang masing-masing berdaya 100Watt.

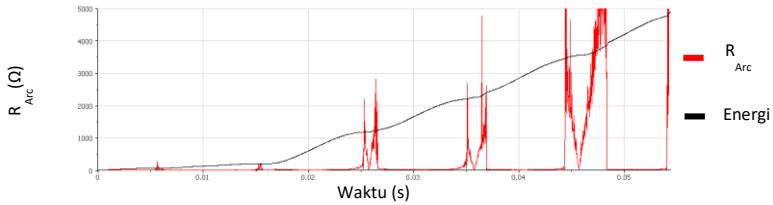
4.1 Pelatihan Jaringan Saraf Tiruan

Pada penelitian ini pelatihan jaringan saraf tiruan menggunakan fungsi *neural network toolbox* yang ada pada MATLAB. Tidak ada parameter yang mutlak untuk mengatur arsitektur pemodelan jaringan saraf tiruan. Namun berdasarkan literatur yang ada, dan beberapa penelitian sebelumnya, arsitektur yang memiliki input lebih dari 2 tidak disarankan menggunakan lebih dari 2 layer. Penentuan parameter maupun arsitektur jaringan saraf tiruan pada metode ini juga melalui proses *trial and error* untuk mendapatkan nilai error dan juga pola output yang paling mirip dengan pola pelatihan. Sedangkan pada penentuan jumlah neuron, penulis menggunakan referensi penelitian sebelumnya yang menyimpulkan bahwa jumlah neuron 20 adalah metode pelatihan yang memiliki tingkat akurasi paling tinggi. Penulis juga menyertakan hasil pemodelan pada 10 neuron neuron sebagai pembanding hasil pemodelan.

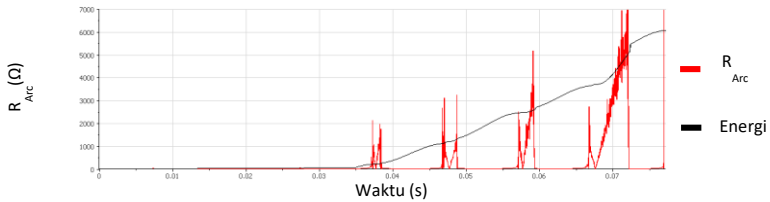
4.1.1 Penentuan Input dan Target Jaringan Saraf Tiruan

Pada hasil percobaan busur api seri tegangan rendah, telah didapat nilai arus dan tegangan pada saat arcing. Hasilnya trend nilai R_{Arc} bertambah, seiring bertambahnya nilai energi arcing dan seiring berjalannya fenomena arcing. Nilai R_{Arc} akan turun sesaat ketika nilai tegangan menurun di tengah fenomena arcing, dan akan bertambah lagi

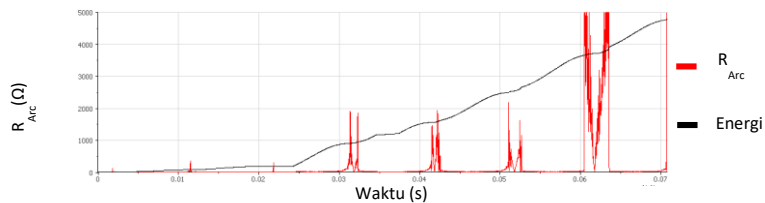
ketika tegangan arcing kembali bangkit. Nilai R_{Arc} akan mendekati nilai tak terhingga pada saat arcing berakhir dan rangkaian menjadi open. Berikut ini adalah grafik perbandingan trend R_{Arc} dan energi pada beban 1, 5 dan 10 lampu.



Gambar 4.1 Perbandingan Trend R_{Arc} dan Energi pada Beban 1 Lampu



Gambar 4.2 Perbandingan Trend R_{Arc} dan Energi pada Beban 5 Lampu



Gambar 4.3 Perbandingan Trend R_{Arc} dan Energi pada Beban 10 Lampu

Dari hasil percobaan ini nilai R_{Arc} hasil percobaan akan menjadi target dari pelatihan jaringan saraf tiruan, sedangkan nilai energi dan tegangan terminal dalam nilai absolut akan dijadikan sebagai input

pelatihan. Ditambahkan pula nilai input tegangan terminal variabel waktu $V_{(t-1)}$ hingga $V_{(t-20)}$ sebagai tambahan.

4.1.2 Penentuan Fungsi Aktivasi

Pada penentuan fungsi aktivasi, *trial and error* dilakukan untuk memperoleh bentuk keluaran pola pelatihan yang paling mirip dengan target pelatihan. Berikut adalah tabel perbandingan fungsi aktivasi:

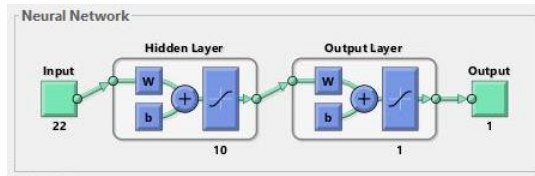
Tabel 4.1 Perbandingan Fungsi Aktivasi

Layer	Fungsi Aktivasi	Neuron	MSE
2	Tansig	20	0.03259307309
2	Logsig	20	0.05207111829
2	Purelin	20	0.07617045321

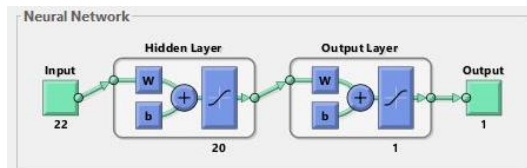
Proses perbandingan fungsi aktivasi menggunakan data percobaan pada beban 1 lampu. Dari proses percobaan perbandingan fungsi aktivasi, hasilnya fungsi aktivasi neuron tansig memiliki nilai performance MSE yang paling optimal dan memiliki keluaran pola pelatihan yang paling mirip dengan target pelatihan dibandingkan dengan fungsi aktivasi purelin dan logsig. Beberapa pelatihan menggunakan fungsi aktivasi logsig bahkan mengalami error pada pelatihan dan iterasi pemodelan berhenti pada nilai *epoch* pertama.

4.1.3 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan

Setelah penentuan input, target dan fungsi aktivasi telah didapatkan, arsitektur jaringan saraf tiruan kemudian dibuat melalui fungsi *neural network toolbox* pada MATLAB. Berikut adalah arsitektur jaringan saraf tiruan dengan algoritma *feed-forward backpropagation* dengan jumlah layer sebanyak 2 buah dan neuron hidden layer sebanyak 10 neuron dan 20 neuron:



Gambar 4.4 Arsitektur Feed Forward Backpropagation 10 Neuron



Gambar 4.5 Arsitektur Feed Forward Backpropagation 20 Neuron

4.1.4 Parameter Tambahan Training Jaringan Saraf Tiruan

Sebelum training pemodelan jaringan saraf tiruan dapat dilakukan, diperlukan parameter tambahan untuk proses iterasi dan pengukuran *error* pemodelan. Berikut adalah parameter yang digunakan pada *neural network toolbox*:

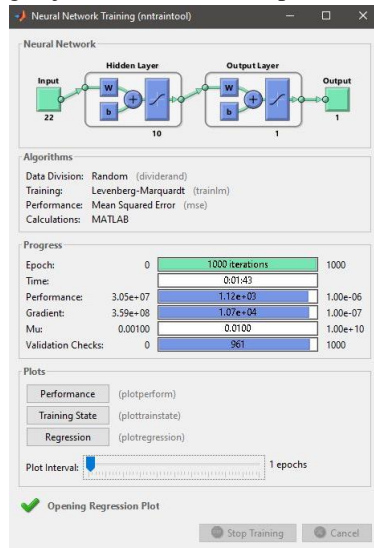
Training Info		Training Parameters	
showWindow	true	mu	0.001
showCommandLine	false	mu_dec	0.1
show	25	mu_inc	10
epochs	1000	mu_max	10000000000
time	Inf		
goal	1e-06		
min_grad	1e-07		
max_fail	1000		

Gambar 4.6 Parameter Tambahan Training Jaringan Saraf Tiruan

Epochs adalah jumlah iterasi yang dikehendaki, goal adalah nilai error yang ingin dicapai oleh keluaran pemodelan, max_fail adalah jumlah kesalahan yang diijinkan. Jika salah satu parameter telah tercapai, maka training akan berhenti walaupun proses iterasi yang dikehendaki belum tercapai.

Setelah parameter telah ditentukan, training dapat dimulai dan tabel monitoring training jaringan saraf tiruan akan muncul. Proses training dapat berhenti pada saat nilai akurasi pemodelan tercapai. Namun pada saat training beban 1 lampu ini, nilai akurasi masih belum tercapai hingga iterasi ke-1000.

Berikut adalah contoh monitoring jaringan saraf tiruan pada beban 1 lampu dengan jumlah iterasi 1000 epochs:

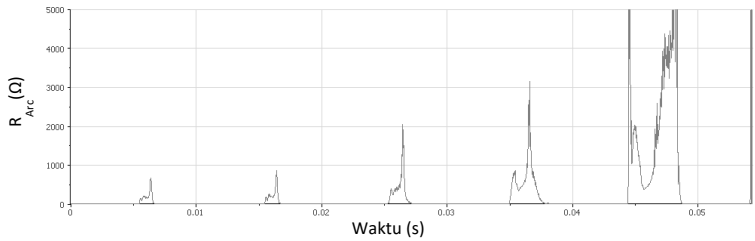


Gambar 4.7 Monitoring Training Jaringan Saraf Tiruan

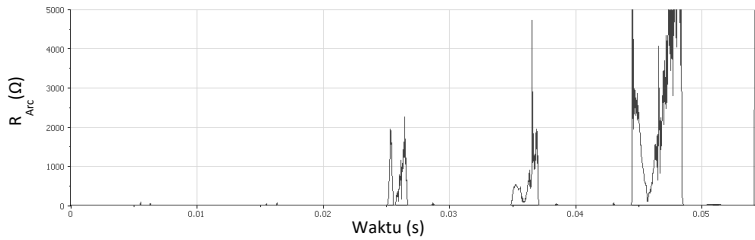
4.2 Hasil Pelatihan Jaringan Saraf Tiruan

Pelatihan Neural Network berikut ini menggunakan algoritma *feed-forward backpropagation* dengan neuron sebanyak 10 dan 20 dan jumlah layer 2 buah. Masing-masing pemodelan R_{Arc} menggunakan

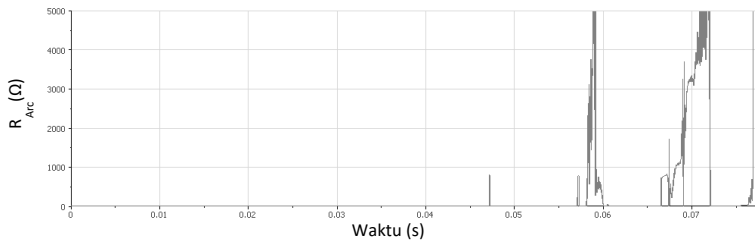
parameter pengaturan, arsitektur dan algoritma yang sama. Berikut adalah hasil dari pemodelan R_{Arc} pada masing-masing beban dengan training 10 dan 20 neuron:



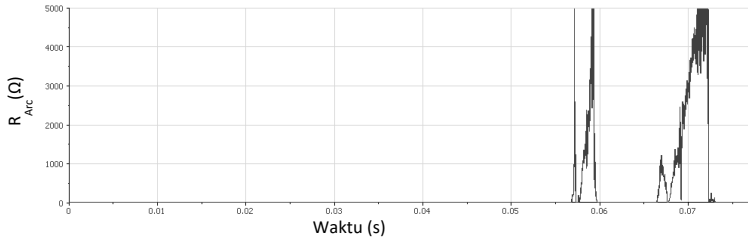
Gambar 4.8 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 10 Neuron 1 Beban



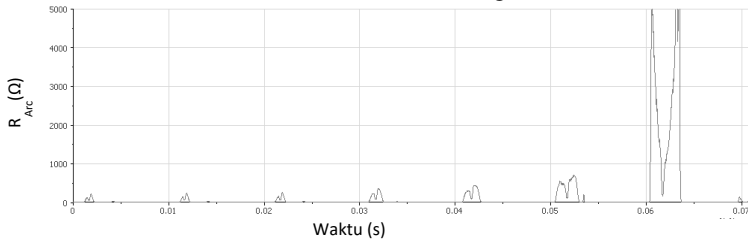
Gambar 4.9 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 20 Neuron 1 Beban



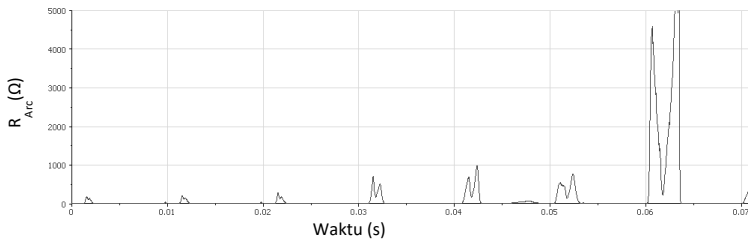
Gambar 4.10 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 10 Neuron 5 Beban



Gambar 4.11 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 20 Neuron 5 Beban



Gambar 4.12 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 10 Neuron 10 Beban

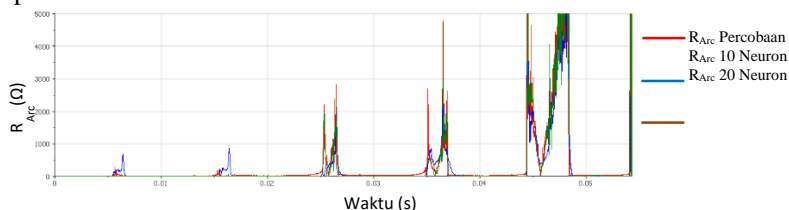


Gambar 4.13 Hasil Pemodelan R_{Arc} Training 20 Neuron 10 Beban

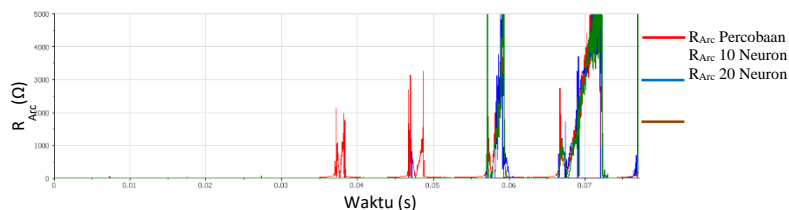
4.3 Perbandingan Data Pelatihan dan Data Percobaan

Masing-masing output dari jaringan saraf tiruan yang berupa R_{Arc} tersebut kemudian dibandingkan dengan data percobaan awal yang dilakukan di lab. Pengukuran perbandingan data pelatihan dan data percobaan kemudian diukur menggunakan performance MSE yang ada pada neural network training toolbox yang disesuaikan dengan *value* data yang digunakan. Berikut adalah hasil perbandingan *trend* antara

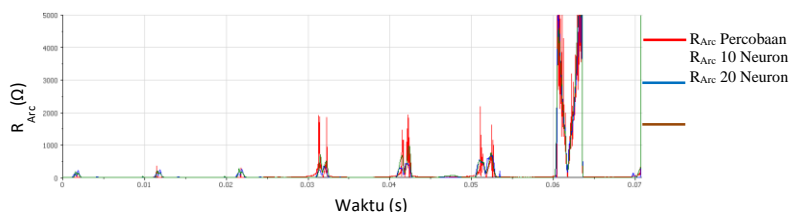
pemodelan pada neural network toolbox dan hasil pengukuran percobaan pada laboratorium.



Gambar 4.14 Perbandingan R_{Arc} Percobaan dan R_{Arc} Training 1 Beban



Gambar 4.15 Perbandingan R_{Arc} Percobaan dan R_{Arc} Training 5 Beban



Gambar 4.16 Perbandingan R_{Arc} Percobaan dan R_{Arc} Training 10 Beban

Dari gambar di atas, terlihat perbandingan hasil percobaan pada laboratorium dan hasil training jaringan saraf tiruan jika dibandingkan dengan hasil pemodelan menggunakan 10 dan 20 neuron. Untuk lebih akurat mengukur performa training jaringan saraf tiruan diperlukan pengukuran error pemodelan. Dari data di atas, hasil *error* pemodelan diukur menggunakan metode MSE (*Mean Square Error*) dengan MATLAB. Hasilnya nilai MSE dari seluruh pemodelan memiliki nilai

kurang dari 0,05. Berikut merupakan tabel data lengkap hasil pengukuran *error* pemodelan training.

Tabel 4.2 Perbandingan Akurasi Pelatihan

Arsitektur ANN	Beban	Jumlah Neuron	MSE
Feed-Forward Backpropagation	1 Lampu	10 Neuron	0.04045729789
		20 Neuron	0.03259307309
	5 Lampu	10 Neuron	0.03212677962
		20 Neuron	0.03292610348
	10 Lampu	10 Neuron	0.02860973161
		20 Neuron	0.03020536468

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pembuatan tugas akhir pemodelan busur api tegangan rendah ini telah melalui tahapan-tahapan yang cukup panjang, mulai dari studi literatur, persiapan alat, penagambilan data, pengolahan data, bahkan sampai pembuatan model. Ada beberapa kesimpulan yang bisa diambil.

Yang pertama adalah karakteristik dari arus busur api listrik adalah nilainya relatif tinggi, namun durasinya relatif singkat. Hal ini yang kemudian menyebabkan alat pengaman tidak mendeteksi adanya gangguan sehingga sistem kelistrikan tidak putus. Hal ini yang kemudian dapat menyebabkan terjadinya kebakaran karena adanya busur api listrik yang terus terjadi.

Pada busur api seri tegangan rendah, nilai R_{arc} akan bertambah seiring bertambahnya energi arcing, dan nilai kenaikan R_{Arc} seiring dengan trend tegangan arcing

Dari Pemodelan arcing diatas, didapatkan nilai MSE untuk masing-masing pemodelan sebesar kurang dari 0,05. Dari nilai tersebut, jumlah neuron maupun beban lampu tidak mempengaruhi nilai MSE secara mutlak.

5.2 Saran

Penelitian ini masih memiliki banyak kekurangan dan memerlukan perbaikan kedepannya. Ada beberapa saran yang dapat dilakukan.

Yang pertama adalah menggunakan *sample rate* yang lebih besar, agar hasil pemodelan dapat lebih akurat.

Membuat program yang lebih *user friendly* karena dalam program ini terlalu banyak pengaturan yang dapat membingungkan bagi orang awam.

Menggunakan metode lain dalam menentukan nilai R arcing sebagai perbandingan dari hasil pemodelan pada penelitian ini.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dinas Komunikasi dan Informatika Provinsi Jawa Timur, “*Kasus Kebakaran di Surabaya Meningkat, Mayoritas Akibat Arus Listrik*” <http://kominfo.jatimprov.go.id/read/umum/46023>. Diakses pada 16 Januari 2017.
- [2] Yuan Wu, Zhengxiang Song, and Xue Li, “*A method for arc fault detection based on the analysis of signal’s characteristic frequency band with wavelet transform*”, IEEE 2nd International Conference on Electric Power Equipment, Matsue, Japan. 2013, pp. 1–4.
- [3] D. G. Ece and F. M. Wells, “*Analysis and detection of arcing faults in low-voltage electrical power systems*”, Electrotechnical Conference, 1994. Proceedings, 7th Mediterranean, vol.3, Antalya, Turki. April 1994, pp. 929–935.
- [4] C. Zhen, L. Xiaopeng, Zhangzhi, W. Qingcong, S. Chong, and L. Chunchi, “*Simple Analysis of the Measurement Methods of Arc Fault*”, International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA), Hunan, China. June 2014, pp. 914–917.
- [5] J. J. Shea, “*Comparing 240 Vrms to 120 Vrms Series Arcing Faults in Residential Wire*”, Electrical Contacts, 2008. Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on, Orlando, Florida. Oktober 2008, pp. 218–224.
- [6] “*What is an Electrical Arc*”. www.creativesafetysupply.com
- [7] T. H. Lee, “Plasma physics and the interruption of an electric circuit,” *Proc. of the IEE*, vol. 57, Mar. 1969, pp. 307–323
- [8] C.T. Lin, and C.S.G. Lee, *Neural fuzzy systems: A neuro-fuzzy synergism to intelligent systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc., 1996
- [9] O. R. Schurig, “Fault voltage drop and impedance at short-circuit currents in low-voltage circuits,” *AIEE Trans.*, vol. 60, 1941, pp. 479–487
- [10] Ercan Ozgan and Recep Demirci, “*Neural Networks-based Modeling of Traffic Accidents In Interurban Rural*

- Highways*”, Journal of Applied Sciences. vol. 8, pp. 146–151, 2008.
- [11] Liga Primabaraka, “*Pemodelan Arus Arcing Tegangan Rendah Pada Kabel Fleksibel (Serabut) Menggunakan Elman Neural Network*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016
 - [12] Jong Jek Siang, “*Jaringan Syaraf Tiruan & Pemrogramannya Menggunakan MATLAB*”, Yogyakarta: Andi, 2005.
 - [13] Mauridhi Hery Purnomo and Agus Kurniawan, “*Supervised Neural Networks dan Aplikasinya*”, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
 - [14] N. Sanjaya, “*Pemodelan Busur Api (Arc Flash) Listrik Tegangan berbasis Jaringan Syaraf Tiruan (Artificial Neural Network)*”, Universitas Dian Nuswantoro, Semarang, 2015
 - [15] O. R. Schurig, “Fault voltage drop and impedance at short-circuit currents in low-voltage circuits,” *AIEE Trans.*, vol. 60, 1941, pp. 479-487

RIWAYAT HIDUP



Muhammad Hafidh As'ad lahir di Sidoarjo pada tanggal 12 Mei 1993. Penulis adalah anak kedua dari tiga bersaudara. Setelah menamatkan pendidikan sekolah dasar di SD Muhammadiyah 1 Sidoarjo, penulis kemudian melanjutkan pendidikan sekolah menengah di SMP Negeri 1 Sidoarjo dan di SMA Negeri 1 Sidoarjo. Pada saat buku ini disusun, penulis sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Di masa kuliah, penulis cukup aktif di beberapa organisasi dan kepanitiaan di dalam maupun di luar kampus. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan melakukan penelitian tugas akhir di Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro FTE-ITS.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---